

# 레일강의 살피거동 및 피로균열 성장거동에 관한 파괴역학적 고찰

## Fracture Mechanical Study on the Charpy V-notch and Fatigue Crack Propagation Behavior of Rail Steels

김 성 훈\*

Kim, Sung Hoon

### Abstract

Since fatigue cracks in rail can be the source of fractures and subsequent derailments, quantitative evaluation of the fatigue behavior and fracture properties due to the analysis results of laboratory test are drawn on the basis for predicting fatigue life and making a decision of safe inspection interval. Charpy V-notch and fracture toughness behavior were evaluated from the results of Charpy impact test. Fatigue test was performed by using CT type specimen under constant amplitude loading, and finally the effects of the following parameters; crack orientation, temperature, and stress ratio, on the fatigue crack growth behavior were studied.

### 요 지

레일강에 있어서 피로균열은 레일의 파괴와 그에 따른 열차탈선의 근본적인 요인으로서 실험실시험의 분석 결과에 의한 피로거동 및 파괴특성의 정량적 평가는 피로수명 추정 및 안전조사 주기설정의 기본이 된다. 따라서 본 연구에서는 살피충격시험의 결과로부터 레일강의 살피거동 및 파괴인성거동을 평가하고 일정진폭하중하에서 피로시험의 분석 결과로부터 피로균열성장거동에 미치는 균열의 방향성, 온도, 그리고 응력비 R의 효과를 파괴역학적 수법을 도입하여 평가하였다.

### 1. 서 론

국철 뿐만 아니라 지하철의 레일은 공용기간 중에 주위의 열악한 환경 및 열차의 반복하중에 의해 파손 및 파단사고가 빈번히 일어나고 있어 레일의 유지관리에 대한 많은 문제점이 제시되고 있다. 이는 레일의 파손에 대한 원인 조사 및 이의 기구에 대한

규명의 불충분과 철도에 대한 유지관리 체계가 확립되어 있지 않음에 기인한다. 레일의 피로균열은 열차 탈선의 주요한 원인으로서 사고 예방을 위한 최적의 피로균열 검사주기를 결정할 수 있는 파손 모델의 개발이 필요하며,<sup>(1)</sup> 이때 레일강의 피로균열 성장 거동의 정량적인 평가는 공용수명을 설정하는데 기본 자료가 된다. 한편, 사용중인 레일에는 균열을 포함한 여러 종류의 결함이 존재하며, 과대한 열차차륜의 반복된 운행으로 그들 결함을 기점으로

\* 정회원 · 쌍용양회공업(주) 연구개발본부 책임연구원

피로 파손 및 파괴가 발생한다<sup>(2)</sup>. 따라서 피로수명을 정량적으로 평가함에 있어서는 레일강의 피로균열 성장특성 및 그 파괴거동의 규명이 중요한 의미를 갖고 있다.

이런 실정에 비추어 최근 피로파괴에 대한 이론 정립 및 피로시험에 의한 자료의 해석기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나 이를 구조물 설계에 적용함에 있어서 피로수명에 영향을 미치는 다양하고 복잡한 제반인자들로 인해 실질적인 피로특성의 평가나 분석이 이루어지지 못하고 있다. 이는 강도 로교나 철도교와 같은 토목구조물 뿐만 아니라 기계분야의 항공기, 선박 등 대형구조물에서도 피로 파손에 대한 파괴역학적 거동이 명확하게 규명되어 있지 않고, 또한 피로파괴 거동에 대한 자료의 부족으로 인해 신뢰도가 높은 잔존수명 예측 및 피로설계가 이루어 지지 않음에 기인한다.

따라서 본 연구는 국내에서 사용되고 있는 삼표산 레일과 NKK산 레일을 공시재료로 사용하여, 먼저 샬피충격(Charpy impact)실험을 통해 레일강의 샬피노치거동과 파괴인성의 거동을 평가하고, 일정진폭하중조건하에서 모드 I 피로시험을 통하여 피로균열성장거동에 미치는 피로균열의 방향성, 주위온도 및 응력비 R의 효과에 대해서 파괴역학적 관점에서 평가하였다.

## 2. 피로균열 성장이론

피로균열 선단 끝에서의 응력은 식 (1)로 표현된다.

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (1)$$

여기서  $\sigma_{ij}(i=x, y, z; j=x, y, z)$ 는 임의 방향의 응력이고,  $r, \theta$ 는 균열 끝에서의 극좌표이며, 함수  $f_{ij}(\theta)$ 는 미지함수이다. 따라서 균열선단 끝에서의 응력장은 응력확대계수 K에 의해 표현될 수 있으며 함수  $f_{ij}(\theta)$ 을 제외하고는 모든 하중 모드에 적용되고 기하학적 형상에 대해 독립적이다. 유한 평판에서의 응력확대계수 K의 일반적인 표현은 식 (2)와 같다.

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \cdot f(a/w) = \beta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

여기서 a는 균열길이,  $\sigma$ 는 공칭응력 그리고  $\beta$ 는 기하학적 형상 함수이다. 따라서, 응력확대계수는 식 (2)에 의해 전응력장에 대해 표현될 수 있으며, 두 개의 다른 균열선단 끝에서의 응력분포는 응력강도가 같으면 같다.

피로하중의 일회 반복당 균열성장비는 식 (3)에 의해  $\Delta K$ 와 관련된 도함수로 표시된다.<sup>(3-5)</sup>

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K) \quad (3)$$

여기서,  $\Delta K$ 는 응력확대계수 폭으로서  $\Delta\sigma$ 를 식 (2)에 대입함으로써 얻어지며, Remote Stress가 한번 반복하는 동안의 응력범위이다. 만약  $da/dN-\Delta K$ 를 복합 log-log 함수로 표현하면 그 결과는 직선식으로 되며 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.<sup>(6-8)</sup>

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (4)$$

여기서 C, m=재료 상수

피로균열성장률 나타내는데 있어 식 (4)는 응력비 R의 영향을 고려하고 있지 않으며 일반적으로  $da/dN$ 은 응력범위 뿐만 아니라 일회 반복주기에 있어서 최대응력 혹은 응력비 R에 의존함이 증명되고 있다.

응력확대계수 K가 임계값  $K_c$ 에 접근하면 파손됨을 감안하여 응력비 R을 고려하여 식 (4)를 수정하면 식 (5)와 같다.<sup>(9)</sup>

$$\frac{da}{dN} = C \frac{\Delta K^m}{(1-R)K_c - \Delta K} = C \frac{\Delta K^m}{K_c - K_{max}} \quad (5)$$

따라서, 식(5)에서 피로균열 성장비  $da/dN$ 은 최대하중에서의 응력강도  $K_{max}$ 가  $K_c$ 와 같게 될 때 무한대로 됨을 의미한다. 한편 식 (5) 이외에  $K_{max}$ 를 고려하여 제안된 균열성장식은 아래와 같다.

$$\frac{da}{dN} = C(K_{max} \frac{\Delta K}{2})^m \quad (Robert \& Erdogan^{(10)}) \quad (6)$$

$$\frac{da}{dN} = C(\frac{\Delta K}{K_c - K_m})^m \quad (河合^{(11)}) \quad (7)$$

$$\frac{da}{dN} = C(\sqrt{\Delta K \cdot K_{max}})^m \quad (Crooker \& Lange^{(12)}) \quad (8)$$

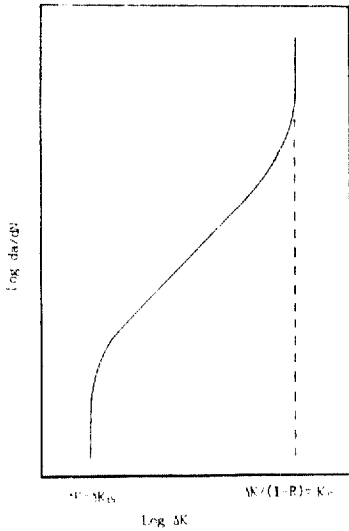


그림 1. Schematic Representation of  $da/dN-\Delta K$  and Propagation Components

또한, 응력강도가 응력강도 하한계  $K_{th}$  이하일 때 균열 성장비는 0에 접근한다는 사실을 반영하면 균열성장비  $da/dN$ 은 식 (9)와 같다.<sup>(13)</sup>

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K^2 - \Delta K_{th}^2) \left\{ 1 + \frac{(1-R)\Delta K}{(1-R)K_c - \Delta K} \right\} \quad (9)$$

따라서 식(9)에서  $da/dN-\Delta K$  관계는  $\Delta K = \Delta K_{th}$ ,  $\Delta K/(1-R) = K_c$ 인 두개의 점근선을 가지며 이를 도식적으로 나타내면 그림 1과 같다.

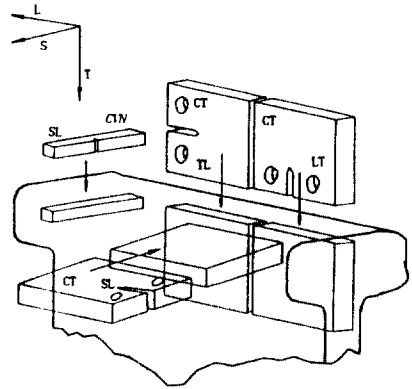


그림 2. Orientation of Specimen

### 3. 재료 및 실험방법

#### 3.1 공시재료

실험에 사용된 재료는 1980년도에 제작된 NKK산 레일강과 1982년도에 제작된 삼표산 레일강으로 경부선 철도에서 공용중에 피로파괴된 60 kg급 레일로서 그 화학적 성분 및 기계적 성질은 표 1, 표 2와 같다. 한편, 각 시험편의 채취부위는 그림 2와 같으며 대상 레일에 대해 동일하게 채취하였다.

#### 3.2 시험편 설계 및 제작

대상 레일에 대한 기계적 성질을 파악하기 위해 ASTM E 8-91규격<sup>(14)</sup>에 따라 인장시험편을 제작하였으며, 샤프거동 및 파괴인성 거동을 규명하기 위해 ASTM E 23-92규격<sup>(15)</sup>에 따라 노치 45도, 깊이 2

표 1. Chemical Composition of Test Rail Steel

Composition Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Sn	Ti
SAM (used)	0.66	0.23	0.83	0.009	0.002	0.003	0.03	0.04	0.006
NKK (used)	0.61	0.22	0.76	0.007	0.003	0.006	0.02	0.06	0.003

표 2. Mechanical Properties of Test Rail Steel

Properties Materials	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Young's Modulus (MPa)	Vicker's Hardness
SAM (used)	551.3	887.9	10.5	227305	23.0
NKK (used)	469.4	889.84	11.3	272222	24.0

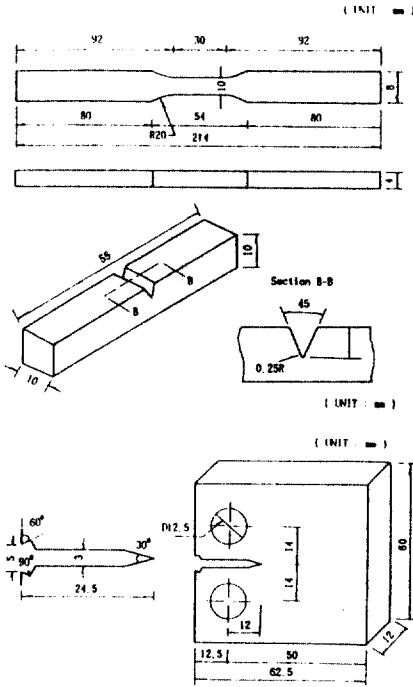


그림 3. Test Specimens

mm, 곡률반경 0.25 mm인 샤피충격시험편을 제작하였다. 피로균열 성장거동을 규명하기 위해 CT 시험편을 ASTM E 647-91(CT형)규격<sup>(16)</sup>에 따라 제작하였고 그림 2에서와 같이 시험편의 채취방향을 3가지로 분류하였으며 본 연구에서 사용한 시험편의 형상 및 치수는 그림 3과 같다.

### 3.3 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 피로/파괴시험기는 Schimadzu사에서 제작한 형식번호EHF-UB25-70인 30t급 유압 서버식 시험기이며, 샤피충격시험기는 30 kg·m 급 표준시험기[CIEH-30-S]이다. 한편 본 연구에서 적용한 실험방법은 ASTM 시험방법을 채택하였다.<sup>(14-16)</sup>

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 Charpy V-notch 거동

레일강에 대한 샤피시험 결과로부터 온도에 따른 흡수에너지를 그림 4에, 횡수축량(lateral expansion)을 그림 5에, 연성파면율(Fibrous Fracture(%))을

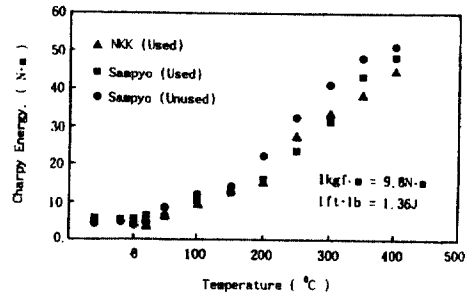


그림 4. Relationships between Charpy Energy and Temperature

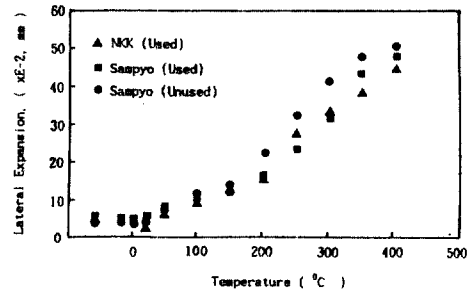


그림 5. Relationships between Lateral Expansion and Temperature

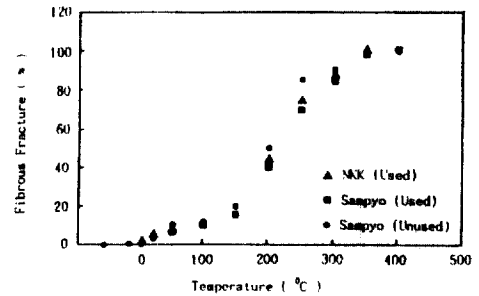


그림 6. Relationships between Fibrous Fracture and Temperature

그림 6에 나타냈다.

그림 4를 살펴보면 사용된 삼표산 레일과 NKK산 레일은 전 온도 영역에 걸쳐 거의 같은 흡수에너지가 발생되지만 사용되지 않은 레일에 비해 흡수에너지가 작게 나타나고 있어 공용중에 레일에 가해지는 열차하중이 레일강을 점차 취성화시킴을 알 수 있다. 그러나 이러한 차이에도 불구하고 최소 시험온도 영역에서는 레일의 사용유무에 관계없이 거의 같은 흡수에너지를 나타내고 있으며 천이온도 영역도 100 °C 에서 300°C 사이임을 알 수 있다. 이와같은 현

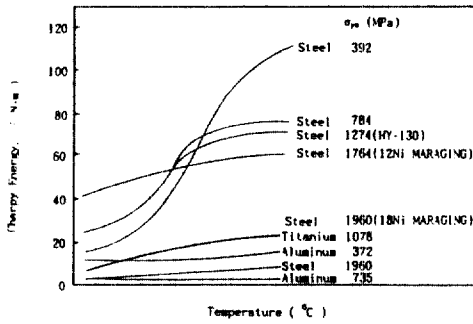


그림 7. Charpy V-notch Energy versus Temperature of Various Materials

상은 횡수축량에 의한 평가에서도 같은 경향이 나타나고 있으며, 연성파면율에 의한 결과로부터 0°C 이하 온도에서의 파괴현상은 완전한 벽개파괴, 그리고 350°C 이상에서는 섬유상을 나타내는 완전한 연성파괴임을 알 수 있다. 한편, 다양한 강재들에 대한 흡수에너지와 온도와의 관계를 나타내면 그림 7과 같다.

이를 살펴보면 항복강도가 작을수록 온도가 증가함에 따라 큰 흡수 에너지가 발생하고 천이온도 영역도 확실하게 나타나는 반면, 항복강도가 1960 MPa 이상인 강재에서는 천이온도 영역이 불분명하게 나타남을 알 수 있다. 한편, 본 연구에서 대상 레일강은 그림 7의 392 MPa 강재와 784 MPa 강재 사이의 샤피충격곡선에 속한다고 할 수 있다. 이상의 결과로부터 국내 레일의 천이온도영역은 100°C ~ 300°C로서 국내 공용온도 범위가 약 -50°C에서 50°C 임을 감안할 때 이 온도 영역에서의 파괴양상은 취성파괴의 가능성이 큼을 알 수 있었다.

#### 4.2 파괴인성 $K_{IC}$ 의 거동

샤피충격시험에 의한 흡수에너지로부터 충격하중 하에서의 파괴인성  $K_{Id}$ 와 정적파괴인성  $K_{IC}$ 를 평가할 수 있음이 많은 연구자에 의해 제안되었으며 Barsom<sup>(17)</sup>이 제시한 실험식은 식 (10)과 같다.

$$\frac{K_{Id}^2}{E} = 5(CVN) \quad [\text{psi} \cdot \text{in}, \text{ft} \cdot \text{lb}] \quad (10)$$

여기서,  $K_{Id}$ 는 동적파괴인성치로서  $\text{psi} \cdot \text{in}^{1/2}$ 의 단위가, CVN은 샤피충격흡수에너지로서  $\text{ft} \cdot \text{lb}$  단위가, 그리고 E는 탄성계수로서  $\text{psi}$ 단위가 사용된다.

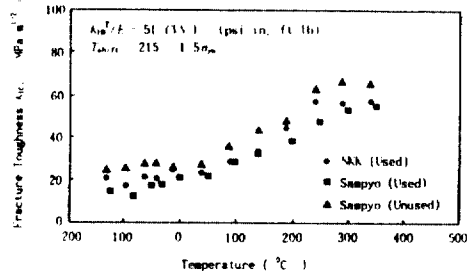


그림 8. Relationships between  $K_{IC}$  and Temperature Proposed by Barsom

한편, 식 (10)에서 얻은 동적파괴인성치를 식 (11)의 온도전환방정식에 의해 정적파괴인성인  $K_{IC}$ 를 평가한다.

$$\begin{aligned} T_{\text{shift}} &= 215 - 1.5\sigma_{ys} \quad (\text{for } 35 \text{ ksi} < \sigma_y < 140 \text{ ksi}) \\ T_{\text{shift}} &= 0 \quad (\text{for } \sigma_y > 140 \text{ ksi}) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,  $T_{\text{shift}}$  : 이동온도(°F)

식 (10)과 식 (11)를 이용하여 샤피흡수에너지로부터 정적파괴인성  $K_{IC}$ 를 구하여 그 결과를 그림 8에 나타냈다. 이로부터 기사용된 레일은 약 100°C 부근에서 거의 같은 값을 나타내고 있으며 230°C에서는 약  $9.52 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 의 차이가 나고 있다. NKK산 레일에서는 50°C 이하에서 약  $20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 로 거의 같은 인성치를 나타내고 있으며 삼표산 레일에서는 전 온도영역에 걸쳐 인성치가 증가하는 경향을 나타내고 있으나 300°C 이상에서는 인성치의 변화는 없다. 한편, 전 온도 영역에 걸쳐 NKK산 레일이 삼표산 레일보다 큰 파괴인성치를 갖으며 기사용 레일이 미사용 레일보다 더 큰 인성치를 갖음을 알 수 있다. 이는 CVN 거동에서와 같은 경향으로서 공용중 외력에 의해 인성이 상실함에 기인한다고 사료된다.

한편, 변형비(strain rate)를 고려하지 않은 상태에서 샤피흡수에너지로부터 slow-bend  $K_{IC}$ 를 평가하는 식이 제안되었으며 이를 나타내면 식 (12)에서 식 (13)과 같다.

$$K_{IC} = 2(CVN)^{3/2} \quad (\text{psi} \cdot \text{in}, \text{ft} \cdot \text{lb}) \quad (\text{Barsom}^{(18)}) \quad (12)$$

$$K_{IC} = 15.5(CVN)^{1/2} \quad (\text{ksi} \cdot \text{in}^{1/2}, \text{ft} \cdot \text{lb}) \quad (\text{Corten \& Sailors}^{(19)}) \quad (13)$$

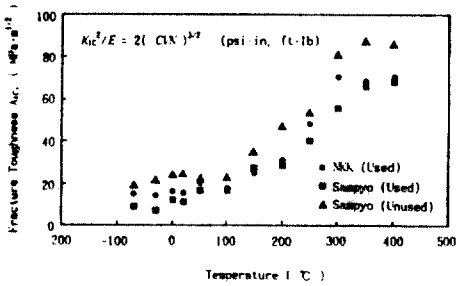


그림 9. Relationships between  $K_{IC}$  and Temperature Proposed by Barsom

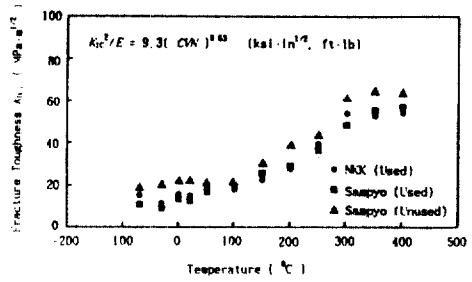


그림 11. Relationships between  $K_{IC}$  and Temperature Proposed by Robert and Newton

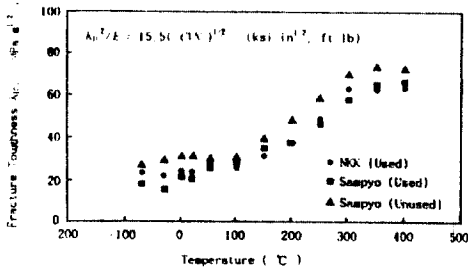


그림 10. Relationships between  $K_{IC}$  and Temperature Proposed by Corton and Sailors

$$K_{IC} = 9.36(CVN)^{0.63} \text{ (ksi, ft·lb)}$$

(Roberts & Newton<sup>(20)</sup>) (14)

본 실험에서 얻은 흡수에너지로부터 상기식을 이용하여  $K_{IC}$ 를 구한 결과를 나타내면 그림 9, 그림 10 그리고 그림 11과 같다.

이들을 살펴보면 250°C 이하의 영역에서는 식 (13)에 의한 평가가 식 (12)에 의한 것보다 약 8 MPa·m<sup>1/2</sup> 정도 더 큰  $K_{IC}$ 값을 가지며, 그 이상의 온도영역에서는 사용되지 않은 레일은 식 (12)에 의한 평가 결과가 상회하며 사용된 레일은 거의 같은 값을 나타내고 있다. 그림 9와 그림 11로부터 사용되지 않은 레일은 100°C 이하에서 그리고 사용된 레일은 200°C 이하에서 식 (12)와 식 (14)에 대한 파괴인성 평가가 잘 일치하며 그 이상의 온도영역에서는 식 (12)에 의한 파괴인성이 더 크게 평가되고 있다. 사용유무에 관계없이 전 온도 영역에 걸쳐 식 (13)에 의한 결과가 식 (14)에 의한 결과보다 약 10 MPa·m<sup>1/2</sup> 정도 크게 평가되고 있다. 그러나 전반적으로 천이온도 이하의 영역에서는 식 (13)에 의한 평가 결과가 가장 크게 평가되며 식 (12)와 식 (14)에 의한 결과는 거의 같은 경향을 나타내고 있다. 한편,

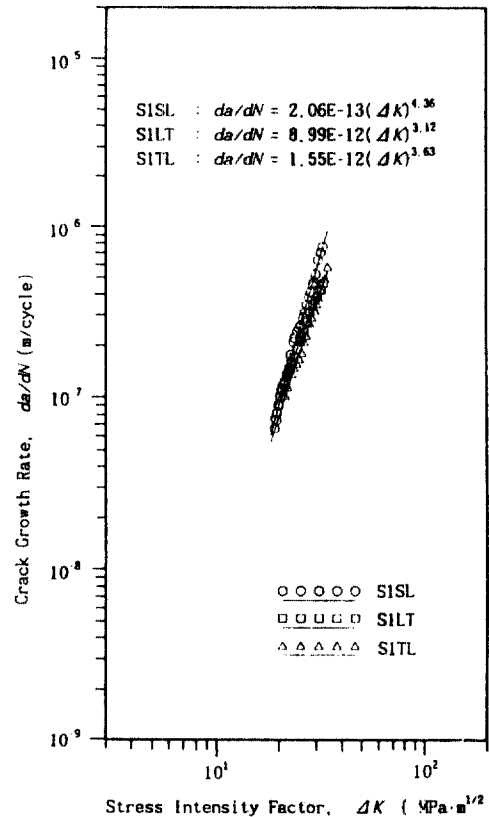


그림 12. Crack Growth Rate at Room Temp. and R=0.1, CT Specimen in All Orientation

Barsom에 의해 제안된 식 (11)에 의한 결과(그림 8)는 Corten & Sailors가 제안한 식 (13)에 의한 결과(그림 10)과 같은 경향이 나타남을 알 수 있으며 천이온도 하한계 이하의 영역에 있어 Corten과 Sailors의 결과를 -50°C 정도 이동시키면 Barsom(그림 8)의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

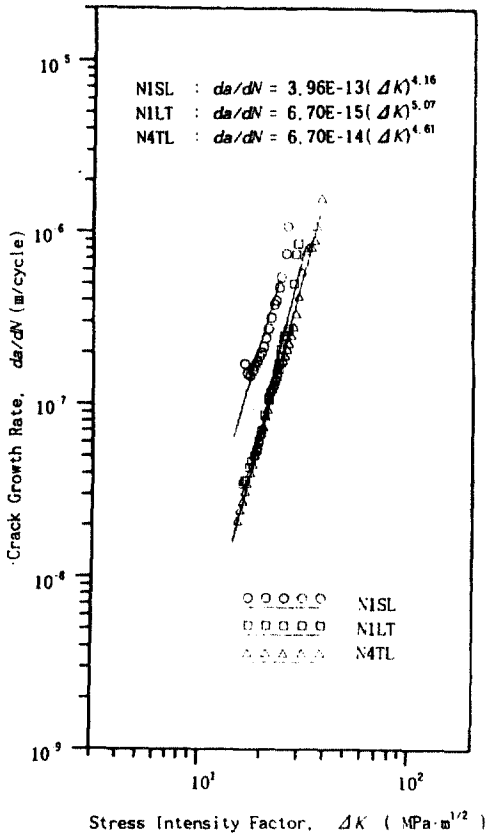


그림 13. Crack Growth Rate at Room Temp. and R=0.1, CT Specimen in All Orientation

### 4.3 레일강의 피로균열성장거동

4.3.1 균열발생 방향성에 따른 성장거동의 비교  
 균열 방향성에 따른 모드 I 균열 성장거동을 평가하기 위해서, 대상 레일별로  $da/dN - \Delta K$ 의 관계를 비교, 정리하여 그림 12, 그림 13에 나타냈다.

이들을 살펴보면 SL방향에 있어 삼표산 레일과 NKK산 레일의 피로균열 성장속도는 큰 차이가 나타나지 않으며 TL 및 LT방향에서는 삼표산 레일의 피로균열 성장속도가 NKK산 레일의 것에 비하여 빠르지만 TL방향에서는  $\Delta K \geq 50 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 에서, 그리고 LT방향에서는  $\Delta K \geq 35 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 에서 이들 레일강의 균열성장속도는 거의 같은 값이다. 삼표산 레일에 있어  $\Delta K$ 가 약  $18.9 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  이상의 범위에서는 SL방향의 피로균열성장속도가 가장 빠르며 TL과 LT방향에 대한 피로균열성장속도는 거의 같음을 알 수 있다. 이러한 현상은 NKK산 레일에 있어 더욱 분명하게 나타나고 있으며 전 응력확대계수범

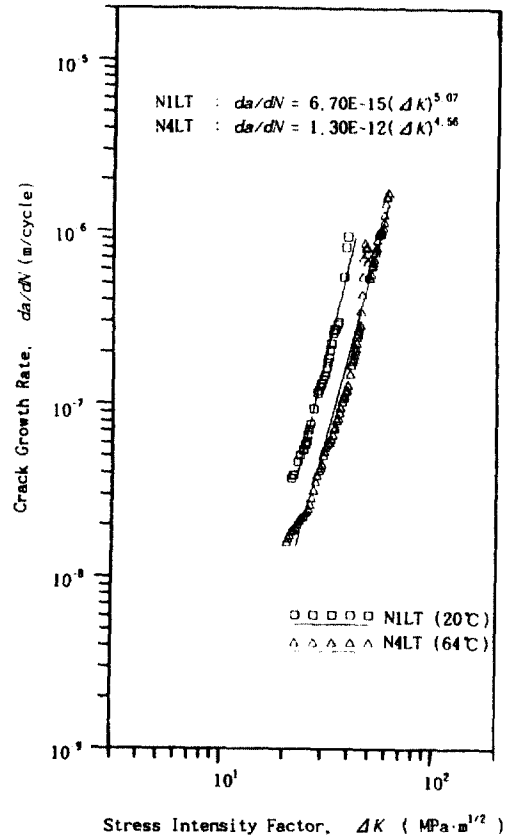


그림 14. Crack Growth Rate at Temp. of 20°C, 64°C and R=0.1, CT Specimens in LT Orientation

위에서 SL방향성을 갖는 균열이 가장 빠른 균열성장속도를 갖음을 알 수 있다. 따라서 방향성만을 고려한다면 TL방향이나 LT방향의 균열보다는 SL방향의 균열이 더 빠른 균열성장속도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

### 4.3.2 균열성장거동에 미치는 온도의 영향

피로균열 성장거동에 미치는 온도의 영향을 평가하기 위해 NKK산 LT방향 및 삼표산 SL방향 시험편에 대한 결과를 그림 14에, 그림 15에 나타냈다.

그림 14로부터 온도가 증가함에 따라 피로균열 성장 속도가 감소하며, 피로균열성장곡선의 기울기  $m$ 값도 감소하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 균열성장 거동에 미치는 온도의 영향은 그림 15에서 더욱 확실히 나타나고 있다. 따라서 균열성장비속도에 미치는 온도의 증가효과는 동일한 응력확대계수 영역에서 균열성장속도는 감소되며 피로균열성

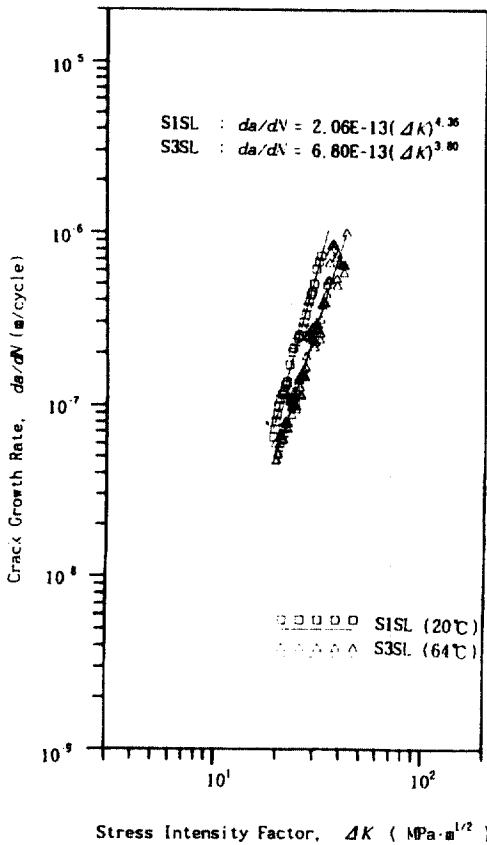


그림 15. Crack Growth Rate at Temp. of 20°C, 64°C and R=0.1, CT Specimens in SL Orientation

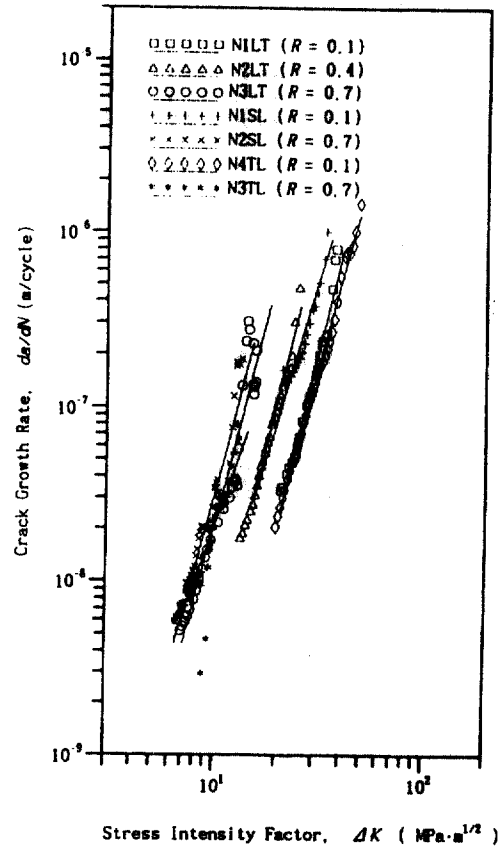


그림 16. Crack Growth Rate for Evaluation of Stress Ratio, CT Specimens in All Orientation, NKK

장식의 기울기 m값도 감소함을 알 수 있다.

4.3.3 응력비 R에 따른 피로균열성장 거동 비교  
레일강의 피로균열 성장거동에 대한 응력비 R의 영향을 평가하기 위해 NKK산레일의 피로시험편에 대해 응력비를 변화시켜 일련의 일정진폭 피로균열 성장시험을 실시하여 그 분석결과를 그림 16에 나타냈다.

그림 16을 살펴보면 응력비 R이 증가할수록 응력확대계수의 적용범위는 낮아지고 균열성장곡선은 좌하단으로 이동하는 경향을 보이고 있다. 한편, 응력확대계수의 범위가 다를지라도 응력비 R이 0.1일 때 보다 0.7일 때 균열성장비가 크게 나타나고 있으며 기울기 m값은 SL방향과 TL방향에 대해서는 응력비 R이 커짐에 따라 커지는 경향을 나타내고 있으나 LT방향에 대해서는 응력비 R이 커짐에도

불구하고 기울기는 거의 변하지 않으며 그 차이는 대단히 작게 나타나고 있다. 따라서 응력비가 커짐에 따라 균열성장속도가 커짐을 알 수 있으나 기울기와의 관계는 일관성이 나타나고 있지 않다. 방향성에 관계치 않고 기울기의 관계를 살펴보면 균열의 방향성에 따른 성장속도의 차이로 인해 피로균열성장곡선의 기울기에 약간의 차이는 있으나 전반적으로 응력비 R이 변화여도 기울기의 변화는 거의 없는 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

1. Charpy V-notch거동의 분석으로부터 레일강은 공용년수의 증가에 따라 살피흡수에너지가 감소하며 천이온도는 100°C ~ 300°C 사이로서 연성파괴의 확



률은 거의 없으며 대부분의 파괴가 취성파괴나 열차차륜의 반복하중에 의한 피로파괴 확률이 높음을 확인하였다.

2. 레일강의 균열발생 방향성에 관한 피로균열 성장거동을 분석한 결과, LT 및 TL방향에 대해서는 같은 균열성장속도를, 그리고 SL방향에 대해서는 훨씬 더 빠른 균열성장 속도를 나타내고 있어 SL방향의 균열이 가장 위험함을 알 수 있었다.

3. 레일강의 피로균열 성장거동은 온도가 증가함에 따라 동일한 응력확대계수 영역에서 균열성장속도는 감소되며 피로균열성장식의 기울기도 감소하는 경향이 나타남을 알 수 있었다.

4. 피로균열 성장거동에 미치는 응력비의 평가로부터 응력비가 커짐에 따라 피로균열 성장속도는 가속되며 이때 피로균열 성장식의 기울기는 거의 일정한 값을 갖으나 C값은 증가함을 알 수 있고 그에 따른 특성곡선은 평행하다.

### 참고문헌

1. Feddersen, C.E. and David Broek., "Fatigue Crack Propagation in Rail Steels", Rail steels-Developments, Processing and Use, ASTM STP 644, 1978, pp. 414-429.
2. 栗原利喜雄, "レール 損傷に関する研究", 日本國有鐵道-鐵道技術研究報告, No. 1188, 1981, pp. 12-13.
3. Barsom, J.M. and Jr. Imhof, E.J., "Fatigue and Fracture Behavior of Carbon-Steel Rails", Rail Steels-Developments, Processing and Use, ASTM STP 644, 1978, pp. 387-413.
4. Yamashita, N., "The Stress and Strain Distribution in the Neck of a Tensile Specimen", Bulletin of JSME, Vol. 9, No. 36, 1966.
5. Owen, D.R.J. and Fawkes, A.J., "Engineering Fracture Mechanics", Numerical Method and Applications, 1983, pp. 5.
6. Paris, P. and Erdogan, F., "A Critical Analysis on Crack Propagation Laws", J. of Basic Eng., Trans. of the ASME, Series D, 1963, pp. 528-534.
7. Roberts, R., Barsom, J.M., Rolfe, S.T. and Fisher, J.W., "Fracture Mechanics for Bridge Design", Report No. FHWA-RD-78-69, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1977.
8. Barsom, J.M., "Fracture Mechanics-Fatigue and Fracture", Metals Handbook-Desk Edition, American Society for Metals, Metal Park, Ohio, 1985.
9. Forman, R.G., Kearney, V.E. and Engle, R.N., "Numerical Analysis of Crack Propagation in Cycle Loaded Structures", J. of Basic Eng., Trans. of the ASME, Series D, Vol. 89, 1967, pp. 459-464.
10. Roberts, R. and Erdogan, F., "The effect of mean stress on Fatigue Crack Propagation in plates under extension and bending", J. of Basic Eng., Trans. ASME 89, 1967, pp. 885.
11. 河合, 未男, "疲勞き裂の傳は舉動に及ぼす平均應力および應力履歴の影響", 43, 1977, pp. 1157-1165.
12. Crooker, T.W. and Lange, E.A., NRL Report 6805, No. 29, 1968.
13. Rosenfield, A.R. and McEvily, A.J., "Some Recent Developments in Fatigue and Fracture", AGARD-R-610, 1973, pp. 2354.
14. ASTM. "Annual Book of ASTM Standards, Section 3 Metal Test Methods and analytical procedures, E 8-91", 1992, pp. 130-149.
15. ASTM. "Annual Book of ASTM Standards, Section 3 Metal Test Methods and Analytical Procedures, E 23-92", 1992, pp. 205-224.
16. ASTM. "Annual Book of ASTM Standards, Section 3 Metal Test Methods and analytical procedures, E 647-91", 1992, pp. 674-701.
17. Barsom, J.M., "Fracture Mechanics-Fatigue and Fracture", Metals Handbook-Desk Edition, American Society for Metals, Metal Park, Ohio, 1985.
18. Barsom, J.M. and Rolfe, S.T., "Correlations Between  $K_{IC}$  and Charpy V-notch Test Results in the Transition-Temperature Range", Impact Testing of Metals, ASTM STP 466, American society for Testing and Materials, Philadelphia, 1970, pp. 281-302.
19. Corten, J.T. and Sailors, R.H., "Relationship Between Material Fracture Toughness Using Fracture Mechanics and Transition Temperature Test", T. & A.M. Report No. 346, University of Illinois, Urbana, Aug. 1971.
20. Roberts, R. and Newton, C., "Report on Small-Scale Test Correlations with  $K_{IC}$  Data", WRC Bulletin 299, Nov. 1984.

(接受 : 1994. 9. 6)